

Sami Peltonen

# Jännitteenkertaajan toiminta ja turvallisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

19.5.2017

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Sami Peltonen Jännitteenkertaajan toiminta ja turvallisuus  20 sivua + 1 liite 19.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka
Ohjaaja	Lehtori Kai Lindgren
<p>Tämän työn tarkoituksena on kasata jännitteenkertaaja osasarja. Laitteesta on tarkoitus mitata jännitteenvahvistusta käyttäen ilmarakoa. Työssä kahden metallijohtimen väliin muodostetaan ilmarako ja siitä mitataan läpilyönnin pituutta. Läpilyönnin pituudesta saadaan arvioitua jännitteen suuruus. Tarkoitus on myös simuloida samanlainen piiri käyttäen Multisim-ohjelmaa ja vertailla saatuja tuloksia. Tämän lisäksi perehdytään kondensaattori-pohjaiseen jännitteen vahvistamiseen, sekä sen turvallisuuteen.</p> <p>Työn alussa käydään läpi jännitteenkertaaja osasarjan komponentteja ja kokoonpanoa, sekä erilaisia mittauksia. Tämän jälkeen perehdytään jännitteen vahvistamiseen sekä erilaisiin sovelluksiin, joissa käytetään kondensaattoripohjaista jännitevahvistusta. Seuraavaksi perehdytään laitteen jännitteenvahvistukseen tutkimalla oskilloskoopilla jännitteen kasvukäyriä. Sen jälkeen perehdytään sähköturvallisuuteen yleisesti, sekä laitetta koskeviin turvallisuus tekijöihin ja määräyksiin. Lopuksi käydään läpi saatuja mittaustuloksia ja vertaillaan niitä simuloinnilla saatuihin tuloksiin ja käydään läpi syitä joiden takia tuloksiin päästiin.</p> <p>Simuloidut tulokset täsmäsivät hyvin oletettuihin arvoihin, mutta ympäristötekijöiden takia mitatut tulokset heittivät jonkin verran. Laite saatiin toimimaan muilta osin moitteitta, joten kokoonpanoa voidaan pitää onnistuneena.</p>	
Avainsanat	sähköturvallisuus, jännitteenkertaaja, kondensaattori, simulointi, osasarja

Author Title	Sami Peltonen Voltage Multiplier Function and Safety
Number of Pages Date	20 pages + 1 appendices 19 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructor	Kai Lindgren Senior Lecturer
<p>The purpose of this work was to assembly voltage quadrupler and focus on capacitors based voltage increase fundamentals and the safety of it. Voltage increase of the device was measured with air gap. Voltage increase was calculated based on the air gap length. The voltage quadrupler circuit was also simulated and the measurements of the voltage quadrupler were compared with simulated ones.</p> <p>The thesis begins with capacitor based voltage multiplier basics and functions. Then it focuses on the parts of voltage quadrupler and assembly of it. After that there are a couple of examples about use of voltage multiplier. Next, electrical safety, focusing general electric safety and also safety standard requirements of the voltage multiplier. Finally is summary about measured and simulated results is given and the reasons for them are considered.</p> <p>Simulated results were very close to the given values but the measured values had some differences. The differences were due to environmental factors. Overall the assembly of the voltage quadrupler was success.</p>	
Keywords	Voltage multiplier, electrical safety, capacitor, simulate

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Jännitteenkertaaja	1
2.1	Jännitteenkertaajan toiminta	1
2.2	Jännitteenkertaaja osasarjan komponentit ja kokoonpano	2
2.3	Sovellukset	4
2.4	Jännitteenkertaajan mittaus	5
3	Simulointi	8
4	Turvallisuus	11
4.1	Sähkön vaikutus ihmiseen	11
4.2	Standardit	13
4.3	Kondensaattorien turvallisuus	14
4.4	Laitteen turvallisuus	15
5	Yhteenveto	17
	Lähteet	19
	Liitteet	
	Liite 1. Kokoonpano-ohje	

## 1 Johdanto

Tämä insinööriyön aihe saatiin Metropolia Ammattikorkeakoulun lehtori Kai Lindgreniltä.

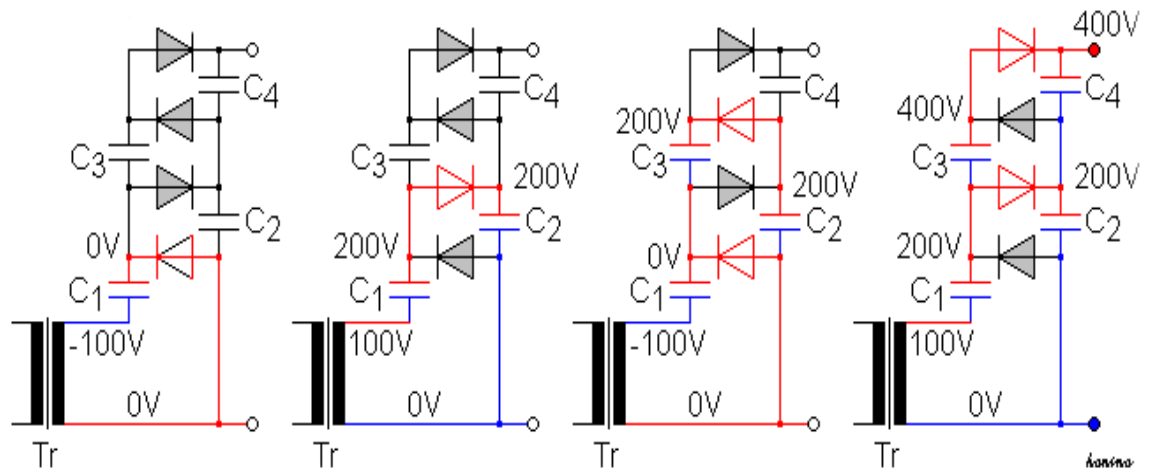
Insinööriyön tarkoituksena on koota jännitteenkertaajaosasarja ja perehtyä kondensaattoripohjaiseen jännitevahvistimen toimintaan sekä sen soveltamiseen. Jännitteenkertaajasta on tarkoitus mitata ulostulevan jännitteen suuruus sekä tutkia oskilloskoopilla jännitteen kasvua jokaisesta kerrontavaiheesta. Mitattujen tulosten rinnalle on tarkoitus simuloida Multisim-ohjelmalla vertailtavat tulokset. Tarkoituksena on vertailla tuloksia ja pohtia syitä tuloksiin.

Toisena tarkoituksena työlle on perehtyä yleiseen sähköturvallisuuteen sekä jännitevahvistimia koskeviin turvallisuustekijöihin ja määräyksiin. Tavoitteena on löytää erilaisia jännitteenkertaajan aiheuttamia vaaratekijöitä ja miettiä niille ratkaisuja.

## 2 Jännitteenkertaaja

### 2.1 Jännitteenkertaajan toiminta

Jännitteen vahvistaminen toteutettiin Kaskadilla eli jännitteenkertaajalla. Sen toiminta perustuu yksinkertaiseen kondensaattorien ja diodien kytkentään. Kuvassa 1 nähdään jännitteen nelinkertojan toimintaperiaate.



Kuva 1. Kuvassa näkyy, kuinka jännite vahvistetaan nelinkertaiseksi. [1.]

Ensimmäisen diodin jälkeen syötetty vaihtovirta muuttuu tasavirraksi, sillä vain vaihtovirran positiivinen piikki kulkee diodin läpi. Samalla ensimmäinen kondensaattori varautuu. Tämän jälkeen lisätään vielä toinen kondensaattori ja diodi ja saadaan jännite kaksinkertaistumaan alkuperäisestä jännitteestä. [1;2.]

Kondensaattoripohjaisen jännitevahvistimen etuna on se, että komponenttien ei tarvitse kestää kuin viereisten komponenttien yli oleva jännite-ero, joka tämän laitteen tapauksessa on noin 2000 voltia.

## 2.2 Jännitteenkertaaja osasarjan komponentit ja kokoonpano

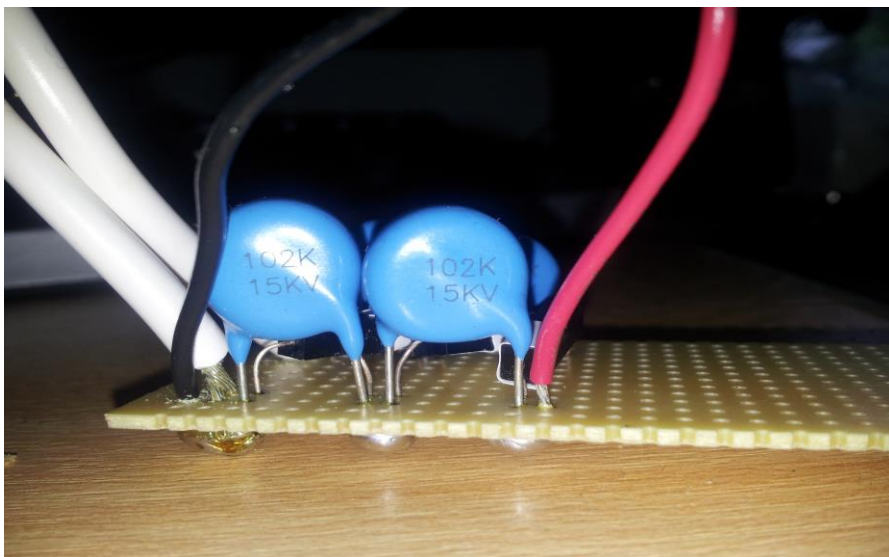
Työn yksi osa on jännitevahvistin osasarjan kokoonpano. Jännitteenkertaaja osasarja lupaa kasvattaa mukana tulevan virtalähteen antaman 2000 voltin suuruisen jännitteen noin 10 000 voltin suuruiseksi. Vahvistuksen suuruus saattaa vaihdella ilmankosteuden, sekä erilaista laitteen sisäisten häviöiden takia.

Työssä käytetään 2000 voltin ja kymmenen milliampeerin vaihtovirtalähdettä, joka on tarkoitettu neonvaloille. (Kuva 2.)



Kuva 2. Virtalähde.

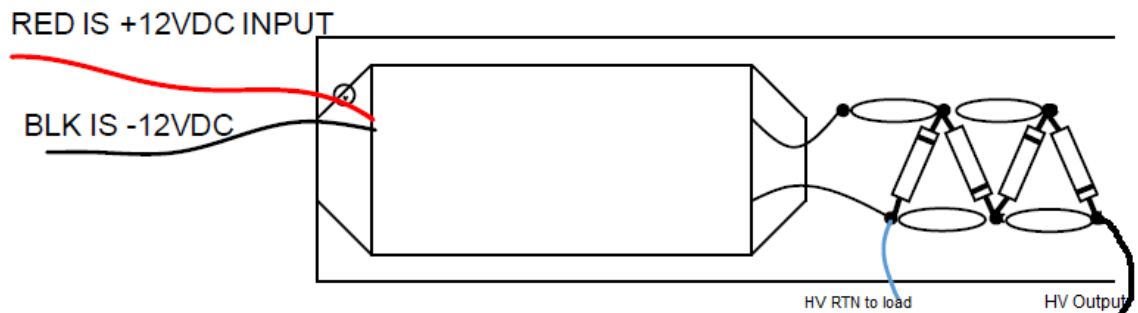
Työssä käytetään neljää keraamisia yhden nanofaradin kondensaattoreita, joita yleensä käytetään pienissä elektronisissa laitteissa. Keraamisten kondensaattorien etuja ovat pieni koko ja pienet häviöt [3]. Kondensaattorit ovat passiivisia kaksijalkaisia komponentteja, joihin voidaan niiden kapasitanssisten ominaisuuksien ansiosta varata sähköä.



Kuva 3. Yhden nanofaradin kondensaattorit, joiden jännitteen kesto on 15 kilovoltia.

Laite kasattiin juottamalla komponentit kytkentälevylle kuvan 4 mukaisesti. Koska kyseessä on suurjännitelaitte, tulee juotoksien olla isot ja pyöreät. Tällä tavalla saadaan maksimoitua jännitteen vahvistus minimoimalla hukkavirta. Myös laitteen turvallisuuden

kannalta on tärkeä, että juotoksissa ei ole teräviä kulmia tai piikkejä, joista sähkö voisi purkautua.



Kuva 4. Kasatun jänniteenkertaajan kaavio. [4.]

Koska tässä työssä laitetta käytettiin vain kondensaattorien lataamiseen ja läpilyönnin pituuden mittaamiseen, tulee turvallisuussyistä kytkeä vähintään 77 kilo-ohmin vastus kytkennän perään. Tulokseen päästään kaavalla 1.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Näin saadaan rajoitettua virran määrä alle 130 milliampeerin, joka on tasavirralla raja, jonka alittava virta ei aiheuta pysyviä vaurioita kehossa.

## 2.3 Sovellukset

Jänniteenkertaajaa käytetään monipuolisesti erilaisissa elektronisissa laitteissa. Sitä käytetään, kun halutaan saada korkeampi jännite ilman syötettävän jännitteen nostoa tai silloin, kun tarvitaan todella korkeita jännitteitä. Nykyään eniten jännitevahvistimia käytetään tutkimus- ja laboratorioympäristöissä.

Esimerkiksi mikroaaltouuneissa käytetään kaskadia 2100 voltin tulojännitteen kasvatamiseksi riittävän suureksi magnetronille. Myös tässä työssä käytettyä jännitevahvistinta voidaan hyödyntää muun muassa sähköisessä hyttysansassa tai sähkölamauttimessa.



## Cockcroft-Walton generaattori



Kuva 5. Cockcroft-Walton-generaattori Lontoon Museossa. [5.]

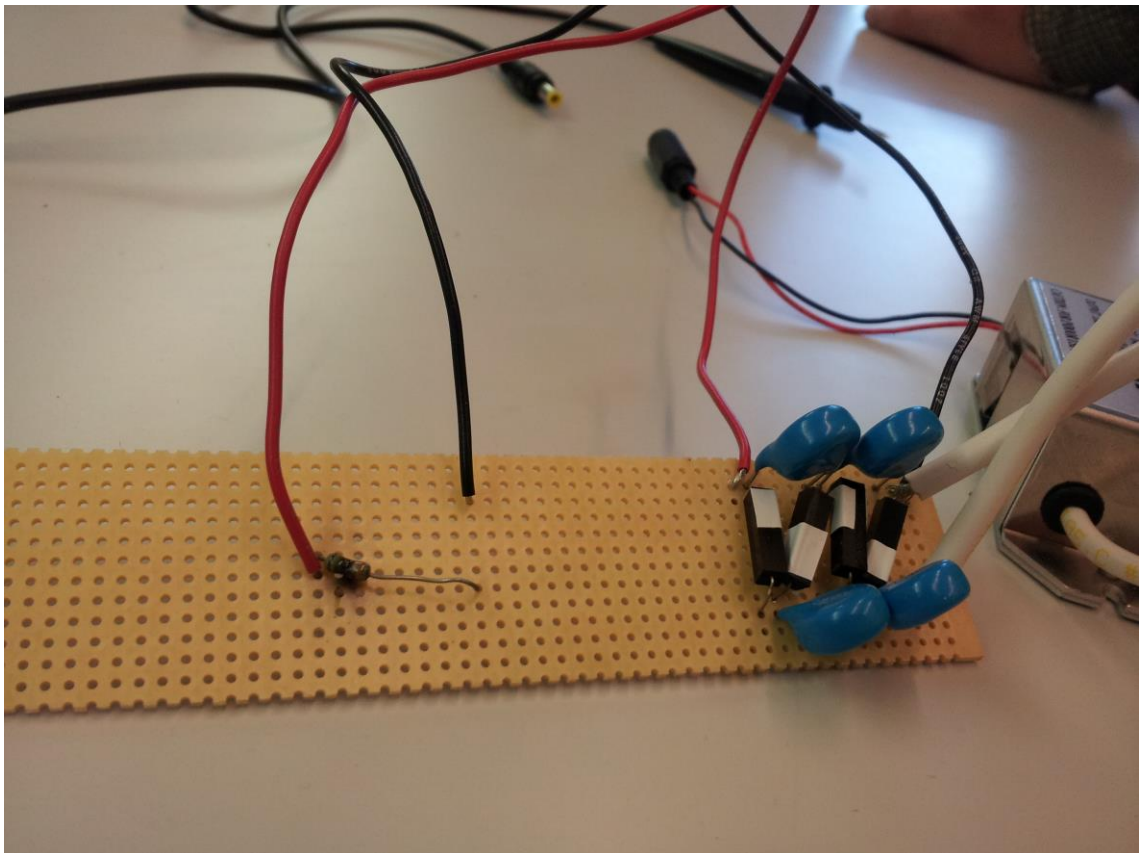
Kuvassa 5 on Cockcroft-Walton-generaattori, joka on jännitteenkertaaja, joka saatiin valmiiksi vuonna 1932 Cambridgen yliopistossa. Sitä käytettiin ensimmäisissä hiukkaskiihdyttimissä, joilla onnistuttiin ensimmäisenä halkaisemaan atomi ja näin ollen luomaan ydinpommei. Cockcroft-Walton-generaattorin toiminta perustui suuriin kondensaattoreihin joihin jännitettä kertomalla saatiin ladattua suuri määrä energiaa. Laitte tuotti 1,0 megaelektronivoltia. Nykyään hiukkaskiihdyttimissä Cockcroft-Walton-generaattorit on korvattu huomattavasti tehokkaammilla radiotaajuus nelinkertaistus systeemeillä. [6.]

### 2.4 Jännitteenkertaajan mittaus

Laitteesta mitattiin jännitteen vahvistusta ilmaraon avulla. Ilmarako luotiin kahden johdon välille, jotka tulivat laitteen ensimmäisen diodin anodilta ja toinen johto viimeisen diodin jälkeen olevan vastukselta. Näin ollen johtojen väliin tulisi muodostu teoriassa nelinkertainen jännite alkuperäisen 2000 voltin sijaan. Jännitteen lopulliseen kasvuun vaikuttaa erilaiset tekijät, kuten vuodot juotoskohdissa, ilmankosteus sekä komponenttien muut häviöt. [7.]

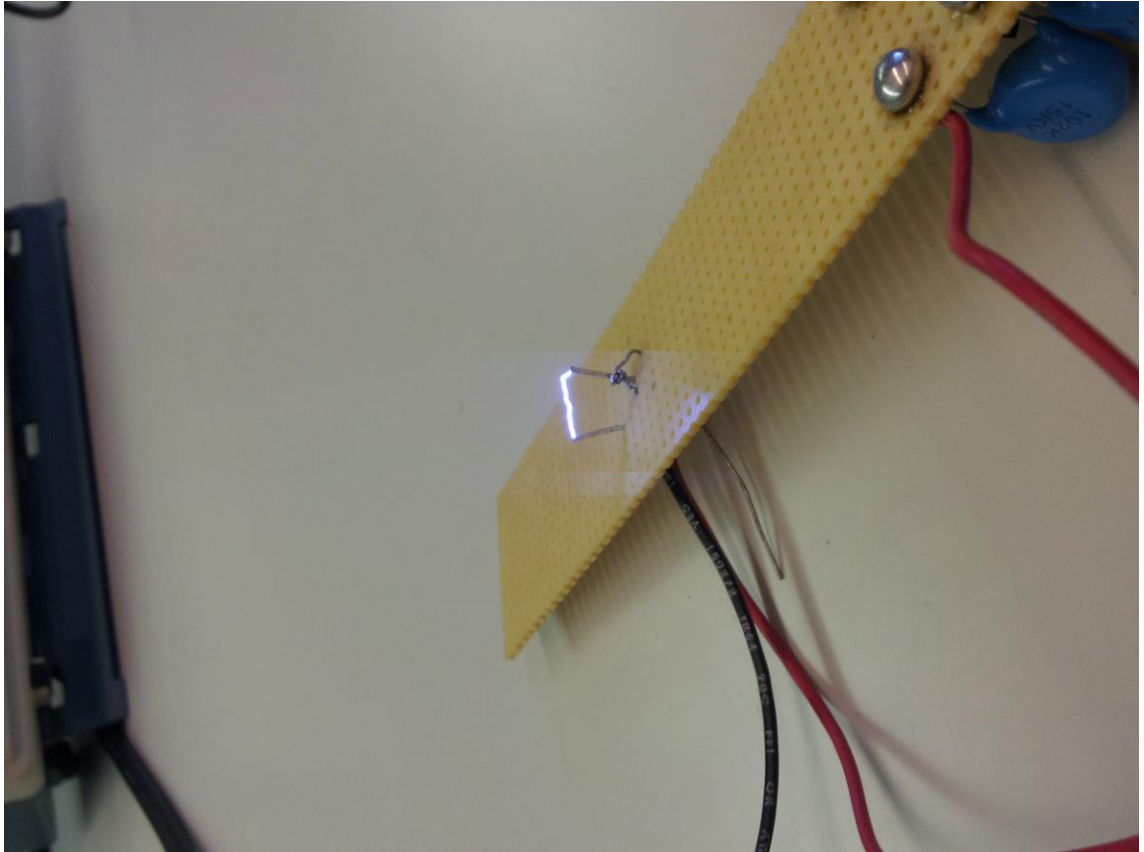
Vaikka virtalähde syöttää piirille 2000 voltin vaihtovirtaa, ensimmäinen diodi päästää läpi vain vaihtovirran positiivisen piikin, jolloin vaihtovirtavirta muuttuu tasavirraksi. Teoriassa laitteen tulisi kasvattaa jännite 2000 voltista noin 10 000 volttiin. Siinä tapauksessa läpilyönnin pituus tulisi olla reilun kolmen millimetrin pituinen, sillä kuivan ilman dielektrinen lujuus on 3 kV/mm. [8.]

Ensimmäisellä mittauskerralla piiriin kytkettiin kuvassa 6 näkyvä 37 kilo-ohmin vastus. Mittausten aikana huomattiin sähköän hypänneen vastuksen yli, vastuksen pienen koon vuoksi ja hajottaneen sen.



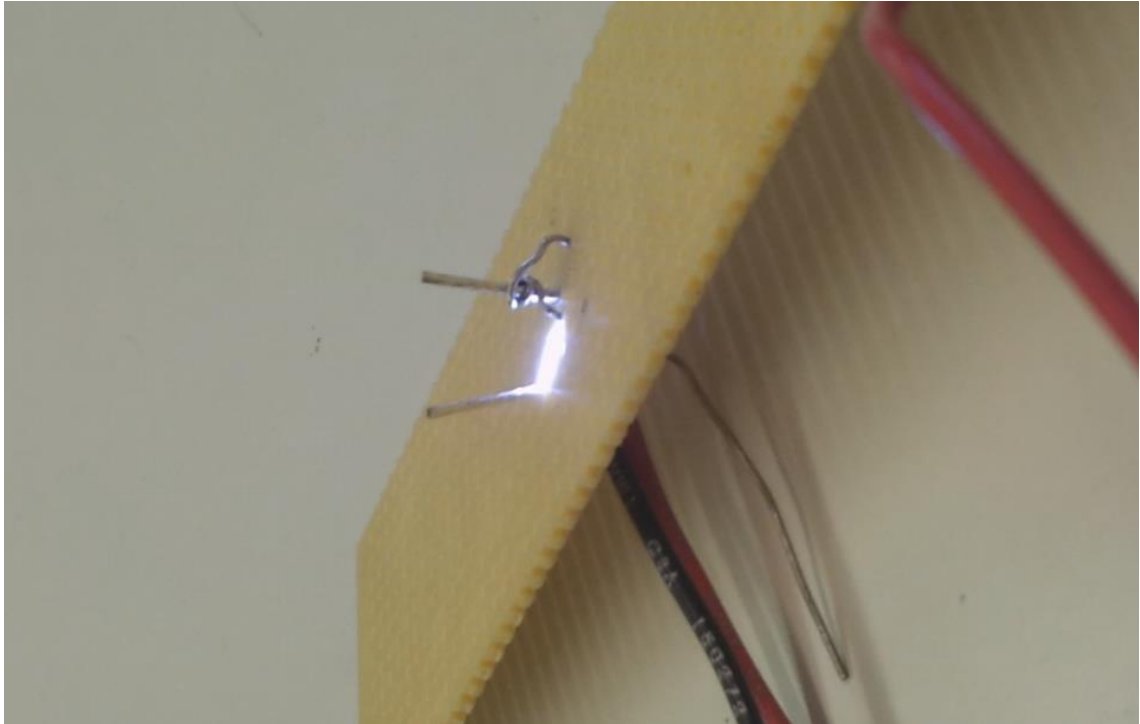
Kuva 6. Mitattu piiri ja liian pieni vastus, jonka yli jännite hyppäsi ja hajotti.

Jännitteenkertaajan läpilyönnin pituudeksi saatiin arvioitua noin yhdeksän millimetriä. (Kuva 7.) Pidemmällä matkoilla ei pysyvää läpilyöntiä tapahtunut.



Kuva 7. Lämpilyönti tapahtuu noin yhdeksän millimetrin etäisyydellä.

Mitatessa kokeiltiin myös tapausta, jossa käytettiin toisistaan erkanevia metallipäitä, jolloin lämpilyönti saatiin tapahtumaan päiden alaosien läpi. (Kuva 8.) Lämpilyönti tapahtui alaosasta koska, jännitteen suuruus ei riittänyt pidempään lämpilyöntiin. Lämpilyönnin tapahtuessa päiden alaosassa saattoi lämpilyönti nousta päitä pitkin ylemmäksi aivan kärkiin asti. Tällöin lämpilyönnin etäisyys kasvoi hetkellisesti huomattavasti pidemmäksi, kuin suora lämpilyönti olisi voinut olla.

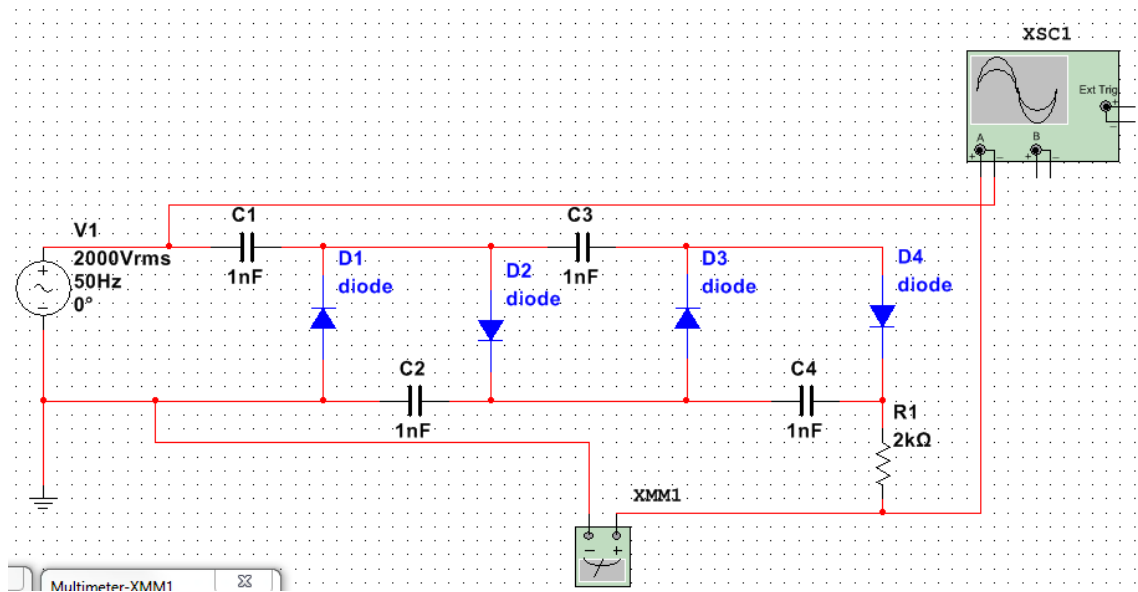


Kuva 8. Lämpilyönti tapahtuu erkanevien päiden alaosasta.

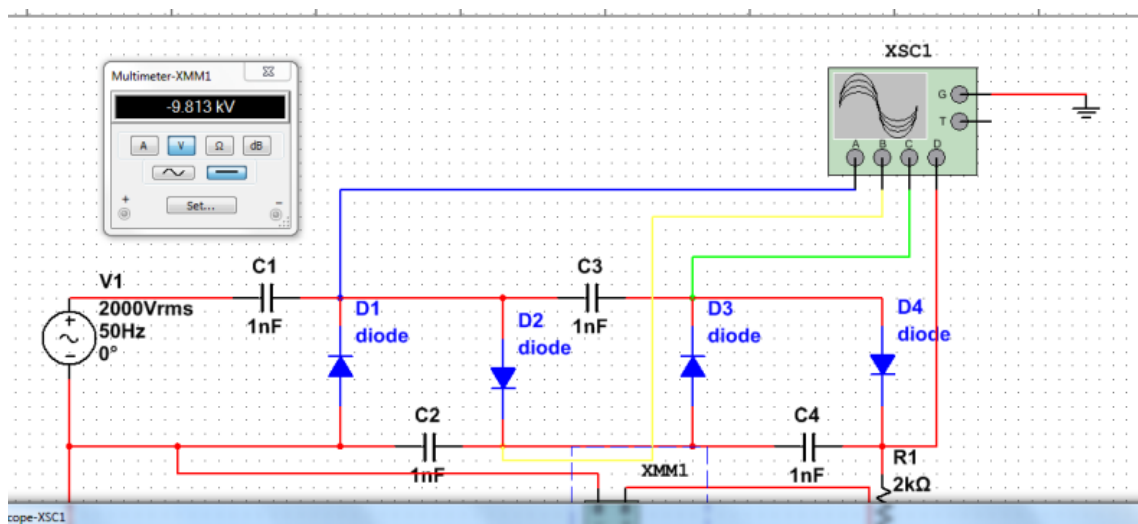
Toisella mittauskerralla käytettiin 330 kilo-ohmin vastusta, joka oli myös fyysiseltä kooltaan edellistä isompi, jotta sähkö ei hyppäisi vastuksen yli. Tällä kertaan lämpilyönnin pituudeksi saatiin työntömitalla mitattua kahdeksan millimetriä.

### 3 Simulointi

Simuloinnilla toteutettiin samanlainen piiri kuin aikaisemmin koottiin, ja tarkoituksena on vertailla kootusta laitteesta saatuja tuloksia simuloituihin vastaaviin tuloksiin. Simuloinnin tekemiseen käytettiin Multisim-simulointiohjelmaa. Kuvassa 9 ja 10 näkyy simuloitu piiri.

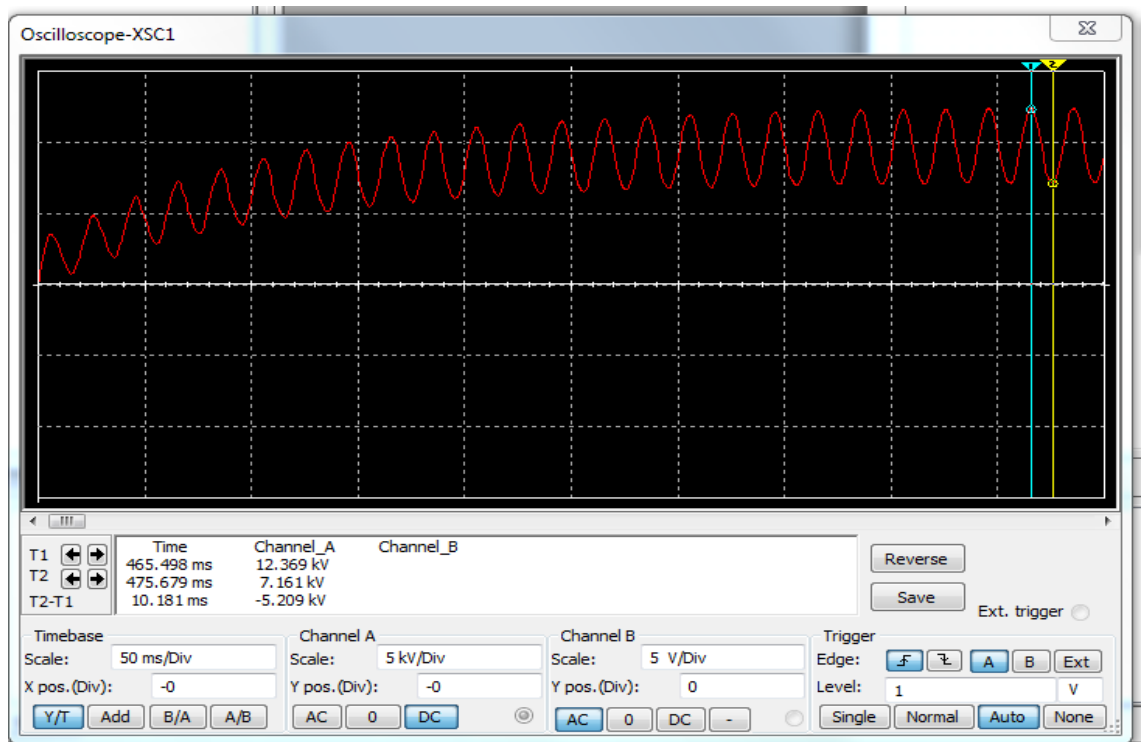


Kuva 9. Multisim-simulointi koko piirin yli. [9.]



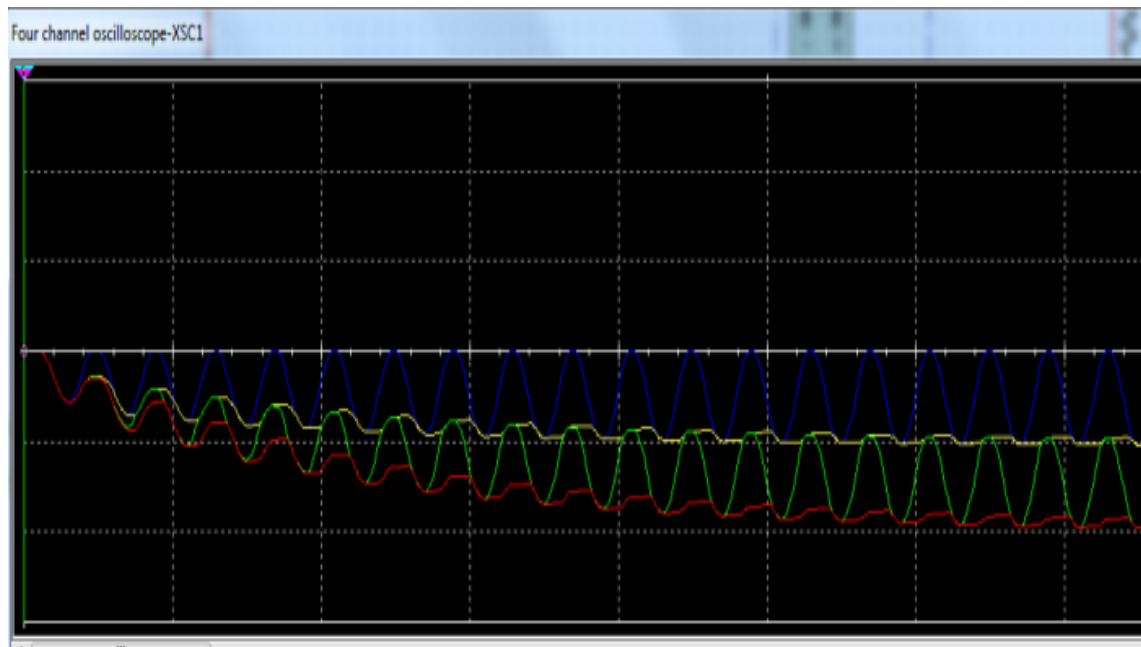
Kuva 10. Multisim-simulointi jokaisen diodin välistä. [9.]

Simuloimalla saatiin piirin keskimääräiseksi jännitteen vahvistukseksi 9814 voltia, joka on varsin lähelle osasarjan lupaamaa 10 000 voltin jännitettä. Jännitteen huipuksi mitattiin 12 369 voltia, kun vahvistus oli kasvanut maksimiin. Simuloimalla saatiin oskilloskoopilla kuvassa 11 näkyvä jännitteen kasvukäyrä.



Kuva 11. Simuloinnin oskilloskooppi kuvaa jännitteen kasvusta koko piirin läpi. [9.]

Kuvassa 12 näkyvät diodien välistä mitattuna jännitteen kasvuvaiheet.



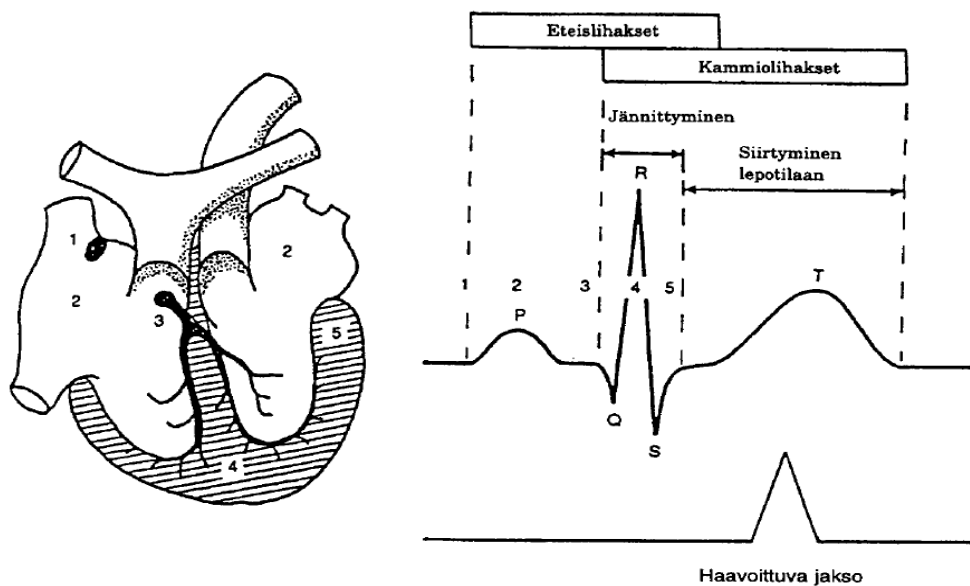
Kuva 12. Simuloinnin oskilloskooppi kuvaa jännitteen kasvusta neljällä tulolla jokaisen diodin välistä mitattuna. [9.]

## 4 Turvallisuus

### 4.1 Sähkön vaikutus ihmiseen

Sähkön kulkiessa kehon läpi se aiheuttaa vaurioita hermostoissa. Tästä voi seurata kipua, lihaskramppeja ja kouristuksia. Iso tekijä sähköiskun vaarallisuudessa on se minkä kehonosan läpi sähkö kulkee. Jo 6 milliampeerin vaihtovirta aiheuttaa sydämen läpi kulkiessaan kammiovärinää, mikä saattaa johtaa kuolemaan. Muilla kehon osilla sähkön vaarallisuuteen vaikuttaa virran voimakkuus, kesto ja taajuus. Yleisesti vaihtovirralla vaarallisena pidetään yli 30 milliampeerin virtaa. Sen ylittävä virta alkaa sähköiskun kestoista riippuen aiheuttaa vahinkoa kehossa. [10.]

Tasavirta poikkeaa vaihtovirrasta vaarallisuudessa pääosin sydämeen kohdistuessa. Siinä missä vaihtovirralla oleellista on sydämen sykkeen vaihe. (Kuva 13.)



Kuva 13. Kuvassa näkyy sydämen haavoittuvuus sähkölle. [11.]

Tasavirta ei myöskään vaurioita hermostoja samalla tavalla kuin vaihtovirta. Tämä johtuu siitä, että sydän ja hermosto reagoivat enemmän sähkön pulssiin kuin tasaiseen virtaan. Siinä missä 60 milliampeerin vaihtovirta alkaa olla tappava, keho kestää yli 300 milliampeerin tasavirtaa. Tasavirran vahingot kehossa ovat lähinnä palovammoja. Tasavirralla ainoastaan virran kytkentä päälle ja pois aiheuttavat kivuliaan lihaskouristuk-

sen, siinä missä vaihtovirta aiheuttaa jatkuvaa kouristelua lihaksissa. Myös vaihtovirtaan jää helpommin kiinni kuin tasavirtaan. (Taulukko 1.)

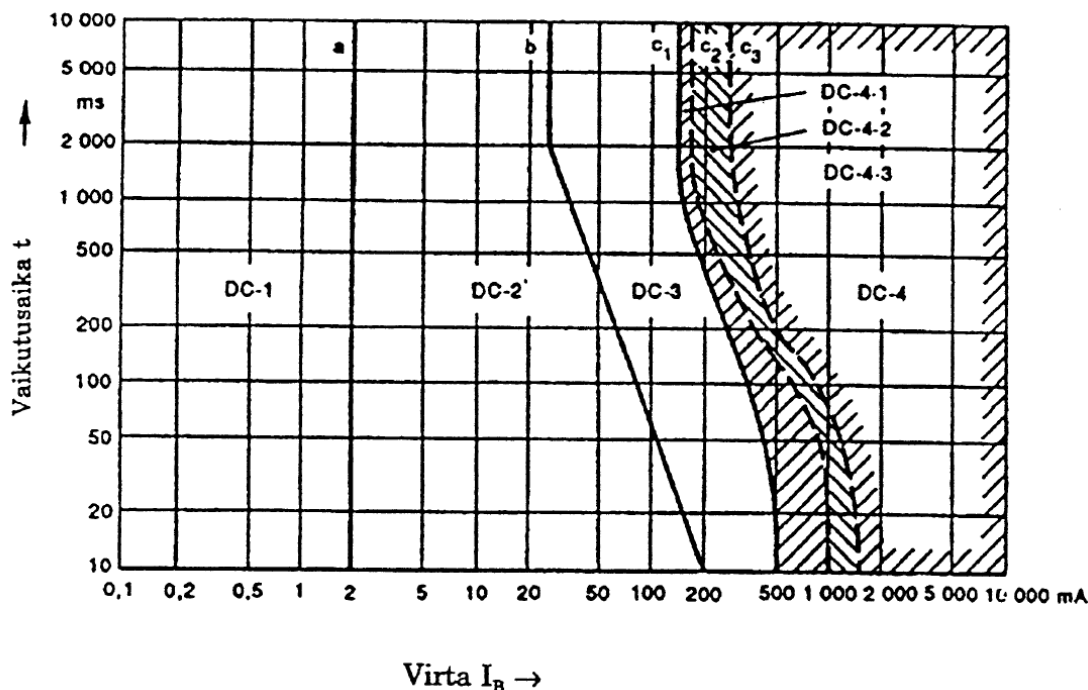
Taulukko 1. Taulukossa näkyy vaihtovirran vaikutus kehoon. [12.]

Virran voimakkuus (mA=milliampeeri)	Vaikutus
1 mA	Ei juuri tunnettavissa, mahdollisesti pistelevä tunne
3-5 mA	Lapsi pystyy itse irrottautumaan sähkövirrasta
6-9 mA	Aikuinen pystyy itse irrottautumaan sähkövirrasta
16-20 mA	Lihasten kouristelu
20-50 mA	Hengityslihasten lamautuminen (hengityspysähdys)
50-100 mA	Sydämen kammiovärinä
Yli 2 A	Sydämen sähköinen toiminta pysähtyy
10-20 A	Yleinen taloussähkön sulakkeiden kestokyky

Sähköiskut aiheuttavat myös muunlaisia tapaturmia, kuten putoamisia. Monet sähkö-onnettomuudet johtavat kouristuksen ja kehon kontrollin menetyksen takia erilaisia putoamisia ja kaatumisia, jotka osaltaan lisäävät sähkö onnettomuuksien vaarallisuutta.



Tasavirralla vaarattomana pidetään alle 130 milliampeerin olveia virtoja. Tämän arvon ylittävät virrat alkavat aiheuttamaan kehossa vaurioita ajasta riippuen. (Kuva 14.)



Kuva 14. Kuvassa näkyy tasavirran vaikutus kehoon. [11.]

Kuvassa 12 näkyy kuinka alueella DC-1 eli 0,1...2 milliampeeria ei aiheudu vahinkoa keholle. Havaittavissa on vain pientä kipua kytkettäessä virta päälle ja pois. Alueella DC-2 eli 2..20 milliampeeria ei vielä tule pysyvää vahinkoa keholle. Alueella DC-3 alkaa näkyä ajan vaikutus vaarallisuuteen. Kuvasta kuitenkin näkee kuinka alle 130 milliampeerin virta ei aiheuta pysyvää vahinkoa keholle. Mikäli altistuminen on erittäin lyhyt, ei edes 500 milliampeerin virta aiheuta pysyviä vaurioita. Alue DC-4-1 sydänkammiovärinän todennäköisyys nousee 5 %:iin. Alueella DC-4-2 sydänkammiovärinän todennäköisyys nousee 50 %:iin. Alueella DC-4-3 sydänkammiovärinän todennäköisyys nousee yli 50 %:iin. [13.]

#### 4.2 Standardit

Työssä käytettyä jännitteenkertaajaa tehdessä tulee soveltaa yleisiä sähkötyöturvallisuusstandardeja SFS 6002, EN 61558-1:2005 ja EN 61558-2-17. Tässä työssä käytettävä jännitteenkertaaja luokitellaan messu- tai protolaitteeksi, joille ei ole tarkkoja turvallisuusmääräyksiä, vaan tulee soveltaa yleisiä määräyksiä. [14.]

SFS 6002 sisältää yleisiä sähkötyöturvallisuus asioita, joita tulee ottaa huomioon jännitteenkertaajaa käytettäessä. Standardi EN 61558-1:2005 sisältää teholähteitä koskevia määräyksiä ja sen toinen osa EN 61558-2-17 sisältää tarkentavia määräyksiä niille. Näitä kahta tulee ottaa soveltuvin osin huomioon.

Standardin EN 61558-1:2005 mukaan kondensaattoreita sisältävä laite tulee suojata kosketukselta, mikäli jokin seuraavista rajoista ylittyy:

- Laitteen käyttöjännite ylittää 35 VAC tai 60 VDC rajan.
- Suurjännitteen tasavirta ylittää kaksi milliampeeria.
- Välillä 60...15 000 voltia purkaus ylittää 15 mikrocoulombia.
- Yli 15 kilovoltin purkaus ylittää 350 millijoulea.

Mittaukset tehdään 2 000 ohmin vastuksella. [15. s.39]

Jännitteenkertaajan kanssa tulee myös huomioida sähkömagneettinen yhteensopivuus. Suurjännitelaitte saattaa aiheuttaa ympäröiville laitteille häiriöitä. Mikäli jännitteenkertaaja on osana isompaa laitetta, on otettava huomioon sen mahdollinen sähkömagneettinen häiriön aiheutus muille laitteen osille.

#### 4.3 Kondensaattorien turvallisuus

Kondensaattorien turvallisuutta huomioonottaessa tulee ymmärtää mikä kondensaattoreista tekee vaarallisen. Kondensaattoreille ei ole tarkkaa arvoa joka tekisi niistä vaarallisen, vaan vaarallisuus koostuu useammasta tekijästä. Suurin tekijä on kondensaattorin kyky varata energiaa. Eli kondensaattoriin pitää voida latautua riittävästi energiaa, jotta se purkautuessaan voi aiheuttaa ihmiselle vahinkoa. Toinen tekijä on kondensaattorin kapasitanssin määrä. Tätä kuitenkin huomattavasti suurempi tekijä on jännitteen suuruus.

Kondensaattoriin varautunut energia saadaan laskettua kaavalla 2.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

W on energian määrä jouleina.

C on kapasitanssi.

V on jännite.

Tästä näemme, kuinka jännitteellä on suuri merkitys kondensaattorien vaarallisuudessa. Kondensaattorit ovat siis huomattavasti vaarallisempi suurjännitteisissä piireissä, kuin pienjännitteisissä piireissä.

Kondensaattoreissa vaarallisena rajana pidetään kykyä purkaa 10 joulea ja tappavana pidetään 50 joulen rajaa. Myös huomattavasti pienempi määrä riittää aiheuttamaan vahinkoa sopivissa olosuhteissa. Myös kondensaattori joka purkaa 25 joulea alle kolmessa sekunnissa tai kymmenen joulea alle puolessa sekunnissa voi olla hengenvaarallinen. [16.]

Kytkenät joissa käytetään kondensaattoreita, tulisivat ne mitoittaa seuraavalla tavalla suhteessa jännitteeseen, jotta kytkenät olisivat turvallisia:

- 10 voltissa kondensaattorin tulisi olla alle 200 000 mikrofaradia.
- 100 voltissa kondensaattorin tulisi olla alle 2 000 mikrofaradia.
- 1 000 voltissa kondensaattorin tulisi olla alle 20 mikrofaradia.
- 10 000 voltissa kondensaattorin tulisi olla alle 0,2 mikrofaradia. [16.]

Kondensaattorien kyky purkaa varauksensa todella nopeasti tekee niistä vielä vaarallisempia. Niiden aiheuttamat vahingot ovat kuitenkin varsin tapauskohtasi, joihin merkittävästi vaikuttaa kuinka mihin sähkö kulkee kehossa. Kehon resistanssi vaikuttaa suuresti sähköän kulkuun, joten esimerkiksi ihon kosteudella on iso merkitys.

#### 4.4 Laitteen turvallisuus

Laitteen turvallinen käyttö vaatii sopivasti mitoitettua vastuksen, jotta virta saatiin rajoitettua alle 130 milliampeerin. Tasavirran ollessa alle 130 milliampeeria sen ei tulisi ai-

heuttaa käyttäjälleen varaa pysyviin vaurioihin. Turvallisuuden vuoksi kannattaa käyttää moninkertaisesti suurempaa vastusta, jotta virta saadaan vielä paljon pienemmäksi.

Jännitteen lyödessä koko ajan läpi, pysyy virta noin kahden milliampeerin suuruisena, joka ei ole käyttäjälle vaarallinen. Vaarana on kuitenkin, jos laite on päällä eikä läpilyöntiä tapahdu. Tällöin energia varastoituu kondensaattoreihin, ja jos tämän jälkeen purkautuminen tapahtuu kehon läpi voi virta saada todella suuriakin arvoja riippuen kondensaattorien koosta, sekä vastuksen koosta. Isot kondensaattorit saattavat ylläpitää vaarallisen korkeaa virtaa pitkän aikaa, jolloin vauriot kehossa voi olla merkittäviä.

Suurimman vaaran käyttäjälle aiheuttaa laitteessa esillä olevat komponentit. Tällöin on mahdollista osua laitteeseen niin että vastus ohittuu, jolloin saatava sähköisku voi olla vaarallinen. Vaarana on myös kondensaattorien latautuessa, että varaus saattaa hypätä kondensaattorista joko komponentin yli tai mahdollisesti liian lähellä olevaan sormeeseen. Iso merkitys laitteesta saatavan sähköiskun vaarallisuuteen on se, mistä kohtaan piiriä sen saa, sillä jännitevahvistimeen varastoitunut energia on merkittävästi suurempi piirin lopussa kuin alussa. Myös laitteen juotoskohtien tinaan jääneet terävät kärjet edesauttavat sähkön hyppäämistä laitteen ulkopuolelle.

Vaikka laitteesta saatava sähköisku ei olisikaan keholle vaarallinen lyhyenä altistumisena, on aina vaarana jäädä kiinni sähköön. Esimerkiksi laitteen virtalähteeltä tuleva kymmenen milliampeerin vaihtovirta saattaa olla tarpeeksi suuri, että siitä ei pysty itse irrottautumaan. Tällöin pidempi altistumisaika saattaa aiheuttaa huomattavasti suuremman vahingon kehossa.

Paras tapa suojautua laitteesta saatavilta sähköiskuilta on juottaa liittimet huolella isoiksi ja pyöreiksi sekä koteloida laite. Tällöin ainoaksi paikaksi saada sähköisku on mittauksessa käytettävien johtojen päät, mutta tällöin virta on vastuksen takia huomattavasti alempi ja näin ollen vaaraton.

Laitteen läpilyöntiä mitattaessa tulee huomioida suurta ultraviolettisäteilyn määrä, joka muodostuu läpilyönnistä. Ultraviolettisäteily on hyvin haitallista silmille suurina määrinä. Liika ultraviolettisäteily altistaa silmät lumisokeudelle eli kivuliaalle silmätulehdukselle. Lumisokeus on ohimenevä, eikä se aiheuta pysyviä vammoja. Pitkäaikainen altistuminen liialle ultraviolettisäteilylle aiheuttaa samentumia, jotka ovat pysyviä. Pitemmällä

aikavälillä muodostuu harmaakaihia ja näön heikkenemistä. Näin ollen suoraa läpilyöntiin katsomista tulee välttää varsinkin pidempiä aikoja. [17.]

Kondensaattorit aiheuttavat myös räjähdysvaaran, kun ne ovat latautuneet suurella energialla sekä kun ne purkautuvat suuresta latauksesta nopeasti. Kondensaattorin valmistusmateriaali ja rakenne vaikuttaa suuresti räjähdysherkkyyteen. Myös kondensaattorien ikääntyessä räjähdysvaara kasvaa. Räjähdysten suurin syy on kondensaattorien liika kuumeneminen.

## 5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli koota jännitteenkertaaja ja toteuttaa sille mittauksia. Mittauksille simuloitiin vertailutulokset Multisim-ohjelmalla. Mittauksissa saatiin ilmaraon pituudeksi yhdeksän millimetriä, joka vastaisi noin 27 kilovoltin jännitettä. Tuloksesta voidaan arvioida ilmankosteuden laskeneen ilman dielektrisen lujuuden noin 1 kV/mm tasolle, jolloin laitteen jännite vastaisi noin 9 kilovoltia. Simuloitu tulos oli 9 814 voltia. Simuloinnin tulos on melko lähelle 10 000 voltin arvioitua tulosta.

Simuloitu maksimijännite oli 12 369 voltia. Tähän tulokseen päästään kaavalla 3.

$$V_{max} = \frac{V_{rms}}{0,707} \quad (3)$$

Tästä maksimiulostulojännitteeksi saadaan 2828,9 voltia, kun jaetaan 2000 voltia 0,707:llä. Tulos kun piirissä kerrotaan neljällä, niin saadaan tulokseksi 11 315 voltia. Tuloksen heittoon vaikuttaa kondensaattorien kapasitanssiset ominaisuudet, jolloin energiaa varastoituu hetkellisesti kondensaattoreihin silloin, kun piiri ei ole johtava.

Oskilloskooppikuvista nähtiin selkeästi, miten jännite kasvaa vaiheittain. Tämä johtuu siitä, että vain virtalähteen syöttämästä vaihtovirrasta positiivinen puoli läpäisee diodin ja näin ollen piiri latautuu vaiheittain.

Jännitteenkertaajan ensimmäisessä läpilyöntimittauksessa käytettiin 37 kilo-ohmin vastusta, jonka kanssa saatiin arviolta yhdeksän millimetrin läpilyönti. Toisella kertaa käytettiin 330 kilo-ohmin vastusta ja läpilyönnin etäisyydeksi mitattiin työntömitalla 8 millimetriä. Tulokset ovat huomattavasti suurempia arvioituun kolmeen millimetriin. Suuret

heiton arvioidun ja toteutuneen tuloksen välillä johtuu eniten ympäristöolosuhteista, kuten ilmankosteudesta ja lämpötilasta. Varsinkin ilmankosteudella on suuri merkitys läpilyönnin suhteen, joten olisi ollut tärkeää mitata se. Mitattu piiri ei myöskään ollut koko ajan johtava, jolloin kondensaattoreihin varastoitu energiaa ja näin ollen jännite pääsi kasvamaan hetkellisesti tavallista suuremmaksi. Tällöin läpilyönti tapahtuu pidemmällä etäisyydellä.

Mittauksia tehdessä huomattiin myös ilmiö, jossa läpilyönti tapahtui toisistaan erkanevien päiden alaosasta, sillä päiden yläosat olivat liian kaukana toisistaan. Läpilyönnin tapahtuessa alaosassa saattoi läpilyönti nousta ylöspäin, jolloin läpilyönnin etäisyys kasvoi huomattavasti suuremmaksi, kuin mitä se olisi voinut suoraan muodostua. Tämä johtuu ilman muuttumisesta johtavaksi, kun voimakas sähkökenttä ionisoi ilman molekyylejä ja sähköön aiheuttama kuumuus ylläpitää ilman johtavuutta. Kuuma ilma nousee ylöspäin ja nostaa samalla läpilyöntikohdan johtimissa ylemmäksi. Läpilyönti ei katkea vaikka rako kasvaa, koska läpilyönnin ylläpitämiseen tarvitaan vähemmän energiaa, kuin läpilyönnin muodostumiseen.

Laitteen turvallisuudessa huomioitavaa on riittävän ison vastuksen käyttäminen, jotta virta saadaan rajoitettua alle 130 milliampeeriin. Myös laitteen kotelointi on hyvä turvatoimi suojamaan kehon kosketukselta. Tärkeää on myös muistaa läpilyönnin mittaamisen jälkeen purkaa kondensaattoreihin varastoitunut energia, joka pysyy piirissä virtajohdon irrottamisen jälkeenkin.

## Lähteet

- 1 Kaskadi. 2017. Kuva 1. wikipedia.  
<[https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaskadi\\_\(elektroniikka\)#/media/File:Voltage\\_amplifier\\_explain.png](https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaskadi_(elektroniikka)#/media/File:Voltage_amplifier_explain.png)>. Luettu 17.4.2017
- 2 Kaskadi. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaskadi\\_\(elektroniikka\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaskadi_(elektroniikka))>. Muokattu 26.3.2016. Luettu 17.4.2017
- 3 Kondensaattori. 2017. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<<https://fi.wikipedia.org/wiki/Kondensaattori>>. Muokattu 2.2.2017. Luettu 17.4.2017
- 4 Amazing1. Kuva4. Kasaushjeet. <<http://www.amazing1.com>>.
- 5 Cockcroft-Walton generaattori. Kuva 5. Wikipedia.  
<[https://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft%E2%80%93Walton\\_generator#/media/File:Cockcroft%E2%80%93Walton\\_generator\\_2012.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft%E2%80%93Walton_generator#/media/File:Cockcroft%E2%80%93Walton_generator_2012.JPG)>. Luettu 18.4.2017
- 6 Cockcroft-Walton Generator. National Museums Scotland.  
<<http://www.nms.ac.uk/explore/stories/science-and-technology/cockcroft-walton-generator/>>. Luettu 23.4.2017.
- 7 Amazing1. Kasaushjeet. <<http://www.amazing1.com>>. Luettu 1.1.2017.
- 8 Alice Hong. The Dielectric Strength Of Air. 2000. Verkkodokumentti.  
<<http://hypertextbook.com/facts/2000/AliceHong.shtml>>. Luettu 15.4.2017.
- 9 Multisim simulointi. kuva 9, 10,11 ja 12.
- 10 Sähköturvallisuus fysiikan opetuksessa. Kevät 2016. Verkkodokumentti.  
<<http://www.courses.physics.helsinki.fi/ope/opelab/turva/sahkoturva.htm>>. Luettu 23.4.2017.
- 11 Opetusmateriaali sähkötyöturvallisuus kurssilta. 2012. Opetusmateriaali. Metropolia AMK. Kuva 13 ja 14.
- 12 Terveyskirjasto. 2017. Taulukko 1. Sähkön aiheuttamat vammat (Sähköisku)  
<[http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00334](http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00334)>. Luettu 17.4.2017.
- 13 Opetusmateriaali sähkötyöturvallisuus kurssilta. 2012. Opetusmateriaali. Metropolia AMK. Luettu 22.4.2017.

- 14 Niemi, Seppo. 2017. Ylitarkastaja. Tukes. Sähköpostiviesti. 19.4.2017.
- 15 Safety of power transformers, power supplies, reactors and similar products. 2005. EN 61558-1:2005.  
<[http://www.anbotek.com.cn/standard/\(%E5%8F%98%E5%8E%8B%E5%99%A8\)Power%20transformers-EN%2061558-1\\_2005.pdf](http://www.anbotek.com.cn/standard/(%E5%8F%98%E5%8E%8B%E5%99%A8)Power%20transformers-EN%2061558-1_2005.pdf)>. Luettu 21.4.2017.
- 16 Stored Energy. 1999. Verkkodokumentti  
<<http://www.stephstuff.com/esafe/StoredEnergy.htm>>. Luettu 21.4.2017.
- 17 Ultraviolettisäteilyn terveysvaikutukset. STUK. Verkkodokumentti  
<<http://www.stuk.fi/web/selkosivut/ultraviolettisateilyn-terveysvaikutukset>>. Luettu 23.4.2017.

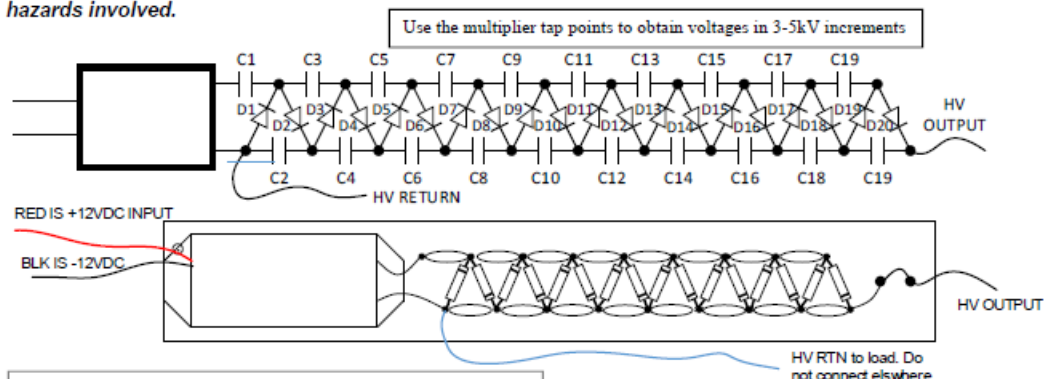


## Kokoonpano-ohje

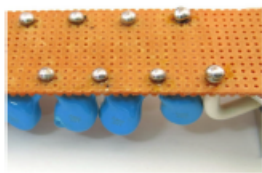
**CH-SERIES HV POWER SUPPLY AND CHARGER rev816**

**Danger!! Danger!! Charging External Capacitors to Over 50 Joules of Energy Exposes The Experimenter To A Potentially Dangerous Shock Device.**

*It is assumed the user of this equipment is experienced in high voltage applications and the associated hazards involved.*

**KIT ASSEMBLY STEPS & OPERATION NOTES**

1. Identify all parts:
  - MINIMAX30/NEONXUL Driver Module (or MINIMAX70)
  - 1-1/2" perf board (length varies by model #)
  - C1-C20: 500/10KV ceramic capacitors (qty varies)
  - D1-D20: VG12 HV rectangular diodes (qty varies) *positive ends identified by blue dye on lead (24") of #20 hook up wire*
2. Attach Driver Module to 5 x 1-1/2" piece of perfboard using RTV silicon rubber.
3. Insert components as shown along with connecting leads.
4. Solder: leaving large, round, smooth globular joints (1/8-3/16") for connections to capacitors, diodes, R1 and HV output points. The solder must completely encapsulate all wiring – any bumps or protrusions will create a break-out point for HV leakage. This is contrary to normal soldering techniques but is necessary in high voltage wiring to reduce corona leakage which occur at sharp edges.



- 4b. It is good to first clean the voltage multiplier (the stack of capacitors and diodes) with denatured alcohol, and then coat with several layers of polyurethane for HV insulation.
5. Connect a source of 12 VDC capable of supplying 1 amp to input leads of Driver Module. Note a bright energetic spark occurring at output leads. Input current should not exceed 1 amp when delivering power.

- Always connect a 2000 to 5000 ohm resistor in series with HV output lead if this device will be used to charge capacitors.
- Unit may be battery or solar powered for portable or field use.
- Output may be used for insect killing grids, shocking supplies, ozone and air purification, ion generation, spark gaps, etc.
- System is a multiple-stage voltage multiplier driven by our MINIMAX3, with 2 stages (4 capacitors) producing an initial 10000 volts. Up to 10 stages may be connected to generate up to 50000 volts. If our MINIMAX7 is used, up to 75000 volts can be generated!

*An excellent science project is possible using the higher voltage modules (20kV or 30kV) for driving a high speed ion motor.*

*For those who intend to use this device as an animal shocker or anti-personal deterrent, it is suggested to obtain our HEC1 plans showing how to electrify objects, vehicles, areas, etc.*

**Measured output:** the actual output voltage may vary lower or higher depending on several factors, such as leakage at the multiplier solder connections, atmospheric humidity, parasitic ground loss, input line voltage, whether a proper no-load HV meter is being used to measure the output voltage, and other factors beyond our control. The multiplier section should be thoroughly cleaned with denatured alcohol and heavily coated with several layers of polyurethane. Place inside a plastic tubing for best effect, and keep the device and HV output wire away from direct ground contact where parasitic HV loss will occur.